

03

Эволюция фракционного состава факела распыла перегретой воды: роль инерционной коагуляции

© С.С. Щигель, Н.В. Васильев, Л.В. Низовский

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: nikvikvas@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2026 г.

В окончательной редакции 3 июня 2026 г.

Принято к публикации 3 июня 2026 г.

Представлены результаты экспериментального и аналитического исследования изменения дисперсного состава факела распыла перегретой воды при истечении через конфузorno-диффузорное сопло. Показано значительное снижение доли субмикронных капель (до $1 \mu\text{m}$) с увеличением расстояния от точки распыла. Предложена модель инерционной коагуляции. Сравнение с проведенным экспериментом подтвердило доминирование инерционного механизма на переходном участке струи. При дальнейшем увеличении расстояния от сопла весомую роль начинают играть турбулентная коагуляция и отличия в разлете капель в факеле полидисперсного состава. Показано, что формирование протяженной струи с преимущественно субмикронной модой возможно на небольших расстояниях от сопла (\sim до 8–10 калибров).

Ключевые слова: перегретая вода, взрывное вскипание, двухфазный поток, мелкодисперсный распыл, субмикронная мода капель, инерционная коагуляция.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.17.63482.20770

В настоящей работе исследуется распыление перегретой воды, которое весьма актуально в связи с различными применениями в новой технике [1–5]. Использование распылов перегретой воды в различных технических приложениях обусловлено прежде всего тем, что при таком способе распыления удастся получить капли микронного (порядка $5 \mu\text{m}$) и субмикронного размеров в отличие от распыления через механические форсунки (более $20 \mu\text{m}$). Это означает, что удельная поверхность капель увеличивается в сотни и тысячи раз, что обеспечивает их гораздо более быстрое испарение.

Применительно к впрыску распыла перегретой воды в компрессор газотурбинных установок необходимо формировать капли со средним размером в факеле распыла менее $3 \mu\text{m}$ для предотвращения эрозии лопаточного аппарата компрессора. Что касается разрабатываемых технологий пожаротушения и дымоосаждения с помощью распылов перегретой воды, то в результате было сформулировано основное направление исследований — обеспечить доставку воды к очагу пожара, минуя пламя, с минимальными потерями на пролив и, главное, в необходимом для эффективного пожаротушения фракционном составе (соотношении между паровой и капельной фазами воды). Были разработаны и опробованы соответствующие технологии [6]. Механизм использования мелкодисперсного распыла воды для тушения различного типа пожаров следующий. Перегретая вода по шлангам под весьма большим давлением транспортируется на нужное расстояние (до 2 м). Подаваемая из шланга мелкодисперсная парокапельная смесь экранирует очаг горения, снижает доступ кислорода, уменьшает тепловое воздействие пламени пожара (капли испаряются, а их суммарная площадь поверхности велика).

Мелкие капли испаряются, экранируя очаг от поступления кислорода, в то время как крупные капли падают на горящий объект, и вода используется недостаточно эффективно.

Парокапельные струи могут быть использованы при тушении практически всех горючих веществ, не вступающих в химическую реакцию с водой с выделением большого количества тепла и горючих газов: бензинов, нефтепродуктов, спиртов, ацетона, других углеводородов и жидкостей, а также твердых веществ (древесины, резины, ПВХ, полистирола). В последнее время особенно актуален вопрос о тушении загоревшихся нефтепродуктов в замкнутых объемах и сжиженного природного газа (СПГ), который легок и образует горящее облако. Витаящие мелкодисперсные капли воды (туман) труднее вступают в контакт с массой СПГ, а кислород блокируют. Но этот вопрос находится в стадии исследования.

Таким образом, исследование дисперсионных характеристик факела распыла перегретой воды имеет большое значение для множества технологий его применения, в частности для чрезвычайно актуального сегодня тушения нефтепродуктов и СПГ.

В контексте разрабатываемых современных технологий пожаротушения и дымоосаждения [7] с помощью распылов перегретой воды необходимо отметить, что проведенные на уникальной установке „Распыл“ в ОИВТ РАН исследования позволили установить соотношения микронной и субмикронной мод капель в факеле распыла перегретой воды в зависимости от ее температуры (T_0) на входе для различных конструкций сопел (рис. 1) [8–10].

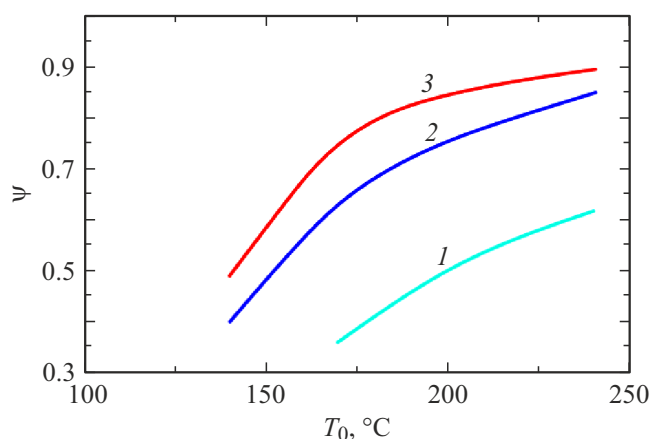


Рис. 1. Зависимость массовой доли субмикронной моды капель ψ в факелах распыла перегретой воды от ее начальной температуры T_0 для различной геометрии сопел. 1 — короткое суживающееся сопло, 2 — сопло с диффузором ($d_0 = 1.6$ mm), 3 — сопло с диффузором ($d_0 = 0.7$ mm).

Также, как показали наши дальнейшие исследования, субмикронная мода сохраняется в факеле распыла в значительном количестве лишь на относительно коротком расстоянии, что вносит свои коррективы в

указанную выше технологию пожаротушения. В работе приведены результаты аналитического решения задачи об инерционной коагуляции капель в факеле распыла, которая является одной из причин уменьшения доли субмикронной моды с увеличением расстояния от среза сопла. Установка и результаты проведенного экспериментального исследования, с которыми производилось сравнение, подробно описаны в [9].

Был исследован распыл перегретой воды при температуре на входе 240 и 260 °С (избыточное давление 4.0 и 6.0 МПа соответственно) через конфузorno-диффузорное сопло (рис. 2) в условиях спутного воздушного потока со скоростью 35 м/с. Избыточное давление (4.0 и 6.0 МПа) создавалось для предотвращения вскипания в подводящих магистралях и обеспечения контролируемого взрывного вскипания именно в сопле. Как показали результаты многочисленных предшествующих экспериментов, данные температуры являются близкими к оптимальным по критерию максимальной объемной доли капель субмикронной моды в факеле распыла. При меньших температурах растет доля микронной моды, а при более высоких температурах возрастает содержание пара (кроме того, возникают технологические проблемы удержания еще более высокого избыточного давления).

При исследовании эволюции фракционного состава факела распыла по длине наблюдалось значительное

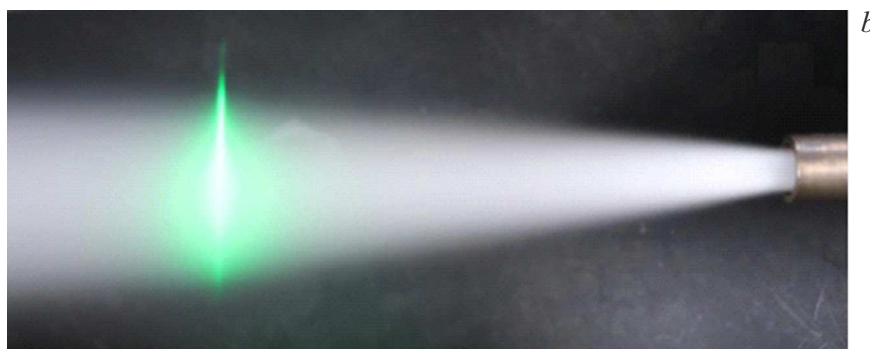
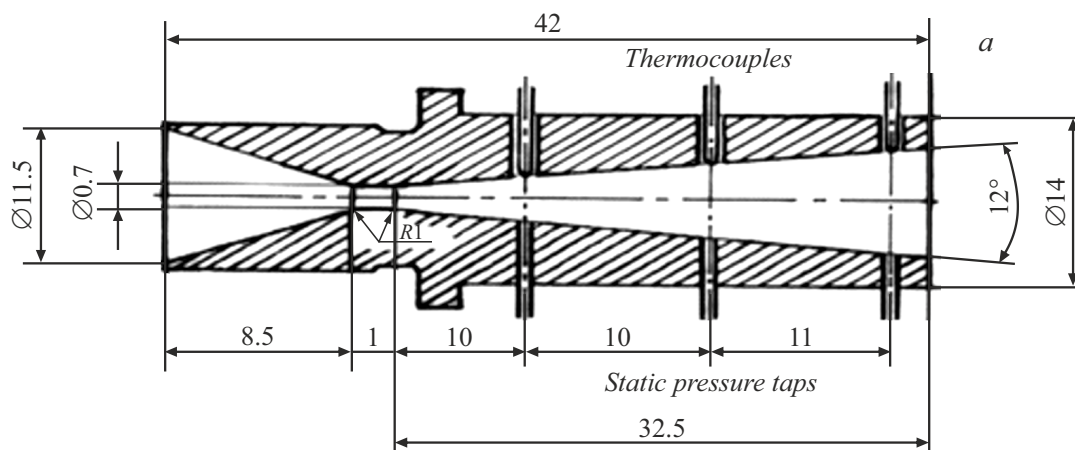


Рис. 2. *a* — схема конфузorno-диффузорного сопла: конфузор — угол 60°, диаметр критического сечения сопла 0.7 mm, диаметр выходного сечения 8 mm; *b* — фотография факела распыла при $T_0 = 240$ °С, $P = 4.0$ МПа и расходе воды 21 ml/s.

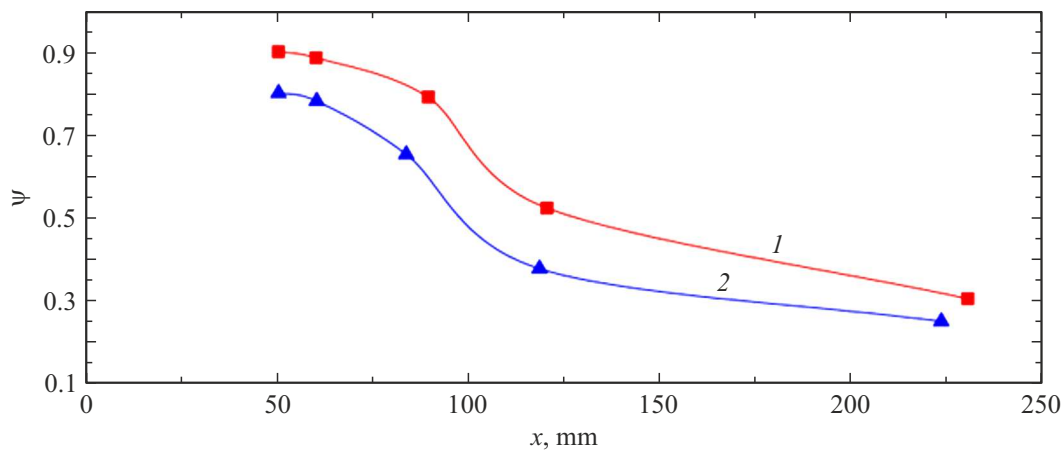


Рис. 3. Изменение массовой доли субмикронной моды капель ψ (на осевой линии факела распыла перегретой воды) с увеличением расстояния x от среза сопла. 1 — $T_0 = 260^\circ\text{C}$ ($P = 6.0\text{ MPa}$), 2 — $T_0 = 240^\circ\text{C}$ ($P = 4.0\text{ MPa}$).

снижение доли субмикронной моды на переходном участке струи (рис. 3). Доля субмикронной моды капель (при радиусе менее $1\ \mu\text{m}$) при 240 и 260°C падала от 0.83 и 0.9 при длине $x = 50\text{ mm}$ до 0.4 и 0.52 соответственно при $x = 120\text{ mm}$ от среза сопла. Особенно заметное падение имело место в начале основного участка смешения факела распыла со спутным потоком воздуха. Далее эта доля продолжала снижаться до 0.27 и 0.29 при $x = 220\text{ mm}$.

Причиной такого снижения является как коагуляция капель, так и более интенсивный разлет субмикронных капель по сравнению с разлетом микронных капель. Аналитически было оценено влияние инерционной коагуляции на уменьшение доли субмикронной моды, играющей основную роль на переходном участке струи факела распыла перегретой воды через конфузурно-диффузорное сопло.

Инерционная коагуляция, являющаяся одной из причин снижения доли субмикронной моды, связана с различной скоростью скольжения капель разного диаметра при торможении струи факела. На начальном участке струи (от среза сопла до 5 калибров) скорость потока не меняется (соответственно инерционная коагуляция капель отсутствует). На рассматриваемом переходном участке струи скорость изменяется от начальной до скорости потока на основном участке струи, которая может быть вычислена по формуле Абрамовича, приведенной, например, в [11]: $v_{f(x)} = \varphi v_{f0} d_0 / x$. Здесь $v_{f(x)}$ — скорость потока на расстоянии x от среза сопла; $\varphi = 0.48 / (a + 0.145 d_0 / x)$, где экспериментальная константа $a = 0.07 - 0.08$; v_{f0} — скорость потока на срезе сопла; d_0 — диаметр выходного сечения сопла; x — расстояние от среза сопла.

Именно к переходному участку струи относится дальнейшее аналитическое решение. Полагая скорости потока и капль на срезе сопла и на начальном участке (от 0 до 5 калибров) постоянными и равными ($v_{f0} = v_{d0}$), определим относительную скорость капль (y_d) по от-

ношению к скорости в начале переходного участка (v_{d0}) как

$$y_d = v_{d0} - v_d,$$

а ускорение (замедление) потока на переходном участке струи примем постоянным и равным

$$a_{f(t)} = \frac{v_{f0} - v_{f(t)}}{t},$$

где t — время движения потока от начала переходного участка до точки измерения, а $v_{f(t)}$ — скорость потока в этой точке. Тогда замедление частицы (при стоксовом обтекании) может быть записано как

$$\frac{dy_d}{dt} = \beta \left(\int_0^t a_{f(t)} dt - y_d \right). \quad (1)$$

При постоянном ускорении на переходном участке ($a_{f(t)} = a_f = \text{const}$) и стоксовом обтекании ($\beta = 9\mu / 2\rho r^2$, где μ — коэффициент динамической вязкости потока, ρ — плотность капль, r — радиус капль) уравнение (1) примет вид

$$\frac{dy_d}{dt} + \beta y_d = t\beta a_f.$$

Тогда решение уравнения (зависимость относительной скорости капль определенного диаметра от времени на переходном участке) принимает вид

$$y_d = a_f \frac{\beta t - 1}{\beta}. \quad (2)$$

Соответственно определяется скорость относительно-го движения двух капль любого размера в рассматриваемом диапазоне, что позволяет построить модель инерционной коагуляции с учетом коэффициента осаждения (улавливания) [12–14], зависящего от числа Стокса для капль субмикронной моды. Число Стокса определяется

как $St = \tau_0 U_d / R$, где τ_0 — время релаксации субмикронной моды, U_d — скорость относительного движения капель субмикронной и микронной мод, R — радиус крупной капли (микронной моды) [15].

Именно на этом переходном участке должно максимально проявляться влияние инерционной коагуляции (что и подтверждается как расчетными оценками, так и экспериментальными результатами, рис. 4). При этом принимается линейная аппроксимация скорости (т.е. $a_f = \text{const}$), что позволяет воспользоваться полученным выше аналитическим решением для относительных скоростей капель в потоке.

Время прохождения струей переходного участка разбивается на большое количество интервалов по времени (Δt) (более 100). При этом диаметр капель субмикронной моды принимается постоянным. Количество крупных капель определяется как объемная доля микронной моды, деленная на объем капли радиуса R . Длина соответствующего участка определяется как $\Delta x = \Delta t U_d$. При этом изменение объема крупной капли определяется как $\Delta V_R = x \pi R^2 C_s \eta$, где C_s — объемная концентрация субмикронной моды, η — коэффициент осаждения (улавливания). Умножение величины изменения объема крупной капли на количество таких капель в единице объема дает увеличение объемной доли микронной моды на данном участке (и соответственно сокращение объемной доли субмикронной моды или ее объемной концентрации). Это учитывается при расчете следующего участка. При этом изменение скорости сближения капель на следующем участке проводится в соответствии с аналитическим решением для скорости замедления капель различного диаметра (2).

Указанный алгоритм дает возможность построения расчетной зависимости изменения соотношения объемной доли микронной и субмикронной мод от расстояния от среза сопла (рис. 4). Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей показывает их хорошее со-

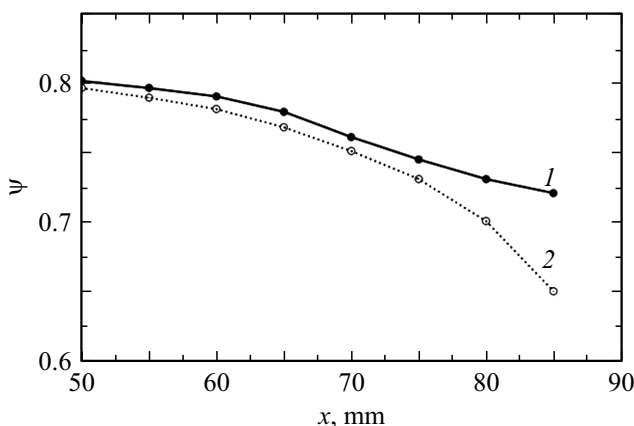


Рис. 4. Сравнение полученной зависимости уменьшения массовой доли субмикронной моды ψ на оси факела распыла на переходном участке в результате инерционной коагуляции от расстояния x от среза сопла с экспериментальными данными ($P = 4.0$ МПа, $T_0 = 240$ °С). 1 — расчет, 2 — эксперимент.

гласие на переходном участке струи. Дополнительными причинами снижения доли субмикронной моды могут быть турбулентная коагуляция и различный разлет капель разных размеров, не учитываемые в приведенном расчете. Это объясняет неполное совпадение расчетной и экспериментальной кривых.

Таким образом, в работе построена расчетная модель и проведен расчет, показавший существенное влияние инерционного механизма коагуляции на изменение размеров капель на переходном участке факела распыла перегретой воды. Определено существенное снижение доли субмикронной моды капель на оси факела распыла с увеличением расстояния от среза сопла. Сравнение с проведенными экспериментальными исследованиями эволюции плотных факелов распыла перегретой воды в диапазоне 240–260 °С через конфузотно-диффузные сопла показало хорошее согласие. Показано, что вследствие эволюции факела распыла перегретой воды через конфузотно-диффузное сопло проблематично формирование протяженной струи, содержащей преимущественно субмикронную моду.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 075-00270-26-00).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, В.Н. Скоков, Письма в ЖТФ, **48** (24), 8 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54015.19373 [K.A. Busov, N.A. Mazheiko, V.N. Skokov, Tech. Phys. Lett., **48** (12), 45 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.12.54946.19373].
- [2] К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, Письма в ЖТФ, **49** (21), 18 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2023.21.56458.19698 [K.A. Busov, N.A. Mazheiko, Tech. Phys. Lett., **49** (11), 15 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.11.57190.19698].
- [3] К.А. Бусов, В.А. Шурупов, Н.А. Мажейко, Письма в ЖТФ, **52** (13), 24 (2026). DOI: 10.61011/PJTF.2026.13.63145.20626
- [4] А.Г. Исламова, П.П. Ткаченко, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак, Письма в ЖТФ, **50** (14), 9 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58301.19893 [A.G. Islamova, P.P. Tkachenko, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, Tech. Phys. Lett., **50** (7), 51 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.07.58728.19893].
- [5] М.С. Шахрай, Д.В. Антонов, П.А. Стрижак, С.С. Сажин, Письма в ЖТФ, **51** (4), 3 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59833.20119 [M.S. Schakh-ray, D.V. Antonov, P.A. Strizhak, S.S. Sazhin, Tech. Phys. Lett., **51** (2), 58 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.02.60633.20119].
- [6] В.В. Росенко, А.Д. Ищенко, С.М. Краснов, С.П. Храпцов, А.И. Соковнин, Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация, № 3, 44 (2017). DOI: 10.25257/FE.2016.3.44-49

- [7] А.В. Пряничников, В.В. Роечко, Е.Б. Бондарев, *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*, № 4, 7 (2015). DOI: 10.25257/FE.2015.4.7-12
- [8] V.I. Zalkind, Yu.A. Zeigarnik, V.L. Nizovskiy, L.V. Nizovskiy, S.S. Shchigel', *High Temp.*, **56** (1), 153 (2018). DOI: 10.1134/S0018151X18010248
- [9] В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский, С.С. Щигель, *Прикладная механика и техническая физика*, **64** (3), 32 (2023). DOI: 10.15372/PMTF202215177
[V.I. Zalkind, Yu.A. Zeigarnik, V.L. Nizovskiy, L.V. Nizovskiy, S.S. Shchigel', *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **64** (3), 388 (2023). DOI: 10.1134/s0021894423030045].
- [10] Ю.А. Зейгарник, В.И. Залкинд, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский, С.С. Щигель, И.В. Маслакова, *Теплоэнергетика*, № 9, 68 (2023). DOI: 10.56304/S0040363623090084
[Yu.A. Zeigarnik, V.I. Zalkind, V.L. Nizovskiy, L.V. Nizovskiy, S.S. Shchigel', I.V. Maslakova, *Therm. Eng.*, **70** (9), 693 (2023). DOI: 10.1134/S0040601523090082].
- [11] Ю.Я. Дмитриев, Ю.М. Новоселов, А.Я. Полянин, *Гидравлические импульсные струи на лесосплаве* (Лесная промышленность, М., 1974). <https://tut-files.ru/previewfile/154650>
- [12] А.Ю. Вараксин, *Столкновения в потоках газа с твердыми частицами* (Физматлит, М., 2008). <https://www.litres.ru/book/a-u-varaksin/stolknoveniya-v-potokah-gaza-s-tverdymi-chasticami-16959540/>
- [13] А.Ю. Вараксин, *ТВТ*, **52** (5), 777 (2014). DOI: 10.7868/S0040364414050214 [A.Yu. Varaksin, *High Temp.*, **52** (5), 752 (2014). DOI: 10.1134/S0018151X14050204].
- [14] А.Ю. Вараксин, *ТВТ*, **57** (4), 588 (2019). DOI: 10.1134/S0040364419040239 [A.Yu. Varaksin, *High Temp.*, **57** (4), 555 (2019). DOI: 10.1134/S0018151X19040230].
- [15] А.Ю. Вараксин, М.В. Протасов, Д.В. Мариничев, Н.В. Васильев, *Измерительная техника*, № 6, 46 (2015). [A.Y. Varaksin, M.V. Protasov, D.V. Marinichev, N.V. Vasil'ev, *Meas. Tech.*, **58** (6), 655 (2015). DOI: 10.1007/s11018-015-0770-7].